

**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ АНОМАЛЬНОГО
ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ**

В.В. Лоскутов

Научный руководитель: О.В. Шефер
Томский политехнический университет
deonold@gmail.com**Введение**

При отражении света от морской поверхности, ледников, кристаллического облака, в состав которого входят преимущественно ориентированные плоские частицы формируются яркие вспышки [1, 2]. В атмосфере возникают световые столбы. Источником света при этом могут являться Солнце, Луна, уличные фонари, и др. На водной поверхности, в результате зеркального отражения, можно наблюдать четкое изображение источника. Раздел оптики, рассматривающий зеркальное отражение от плоских поверхностей является унифицированным как для моделирования зеркального отражения.

В настоящее время, согласно устоявшейся терминологии, появление высоко интенсивного обратного сигнала принято называть эффектом аномального обратного рассеяния. Коэффициенты обратного рассеяния для тех аномальных обратных сигналов, которые удалось зарегистрировать, составляли единицы и даже десятки обратных километров [2]. Во всех экспериментах, в которых наблюдалось аномальное обратное рассеяние, установлено, что оно является следствием зеркального отражения сигнала от плоской поверхности атмосферных кристаллов или водной поверхности.

Формализм расчета

В рамках метода физической оптики (метод применим, когда величина длины волны падающего излучения много меньше размера рассеивателя) была разработана оптическая модель круглой пластинки для исследования рассеяния оптического излучения в задней полусфере [3]. Задней полусферой называется часть сферы, содержащая плоскость основания пластинки и отраженные лучи от ее основания. Круглая пластинка является обобщенной моделью отдельной частицы дисперсной среды, представленной пластинчатыми кристаллами.

Общее выражение, определяющее коэффициент обратного рассеяния представляется в интегральной форме

$$\beta_{\pi} = \int \sigma_{\pi} \cdot N(a) da, \quad (1)$$

где σ_{π} – сечение обратного рассеяния, $N(a)$ – функция распределения частиц по размерам. Круглая пластинка имеет радиус a и толщину d . Из многочисленных натурных исследований кристаллических облаков при различных температурных режимах установлено, что распределение частиц по

размерам имеет ярко выраженный максимум [4]. При этом модифицированное гамма-распределение

$$N(a) = C \frac{\mu^{\mu+1}}{G(\mu+1)} \cdot \frac{1}{a_m} \cdot \left(\frac{a}{a_m}\right)^{\mu} \cdot \exp\left(\frac{-\mu \cdot a}{a_m}\right). \quad (2)$$

адекватно описывает спектр размеров атмосферного кристаллического образования. Формула (2) включает в себя следующие параметры: C – концентрация пластинок, a_m – определяющий размер кристалла, соответствующий максимуму функции $N(a)$, μ – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума, $G(\mu+1)$ – гамма функция. Следует отметить, что для пластинчатых кристаллов установлена взаимосвязь между толщиной d и диаметром $2a$ (например, $d=2.020(2a)^{0.449}$) [4], что позволяет использовать формулу (1). Для анализа данных как численных, так и экспериментальных, как правило, используют средний радиус (\bar{a}). В случае модифицированного гамма – распределения (2) средний радиус частиц \bar{a} связан с параметрами μ и a_m согласно формуле $\bar{a} = a_m(1+1/\mu)$.

В случае нормального расположения пластинок относительно направления падения излучения на их основание удастся получить аналитическое выражение, определяющее коэффициент обратного рассеяния. С учетом формулы (2) соотношение (1) преобразуется к виду

$$\beta_a = \left| \frac{\tilde{n}-1}{\tilde{n}+1} \right|^2 C \frac{k^2}{\pi} \left(\pi \bar{a}^2 \right)^2 \prod_{j=1}^3 \left(1 + \frac{j}{\mu+1} \right). \quad (3)$$

Здесь k – волновое число ($k=2\pi/\lambda$, λ – длина волны падающего излучения). Оптические свойства вещества задаются комплексным показателем преломления $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + i \cdot \chi(\lambda)$. Вещественная часть n , называемая коэффициентом преломления, определяет запаздывание (или опережение) фазы волны, прошедшей через вещество. Мнимая часть χ , называемая показателем поглощения, определяет уменьшение интенсивности. Формула (3) позволяет при известном среднем радиусе и концентрации пластинок в рассеивающем объеме оценить амплитуду зеркально отраженного сигнала.

Обсуждение результатов расчета

Нами выполнено численное исследование обратного рассеяния оптического излучения для системы горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов. Для их расчета входными

параметрами являлись: значения комплексного показателя преломления (n , χ), параметры распределения частиц по размерам (C , μ , \bar{a}), длина волны (λ) падающего излучения. Для определенности рассматривалась круговая поляризация падающего излучения.

На рис. 1 и 2 показаны аномально высокие значения коэффициента обратного рассеяния при различных параметрах распределения частиц по размерам. Для $C=0.8 \text{ л}^{-1}$ и $\bar{a}=37 \text{ мкм}$ коэффициенты обратного рассеяния измеренные в эксперименте достигали 17 км^{-1} [2]. Сравнивая данные численного и натурного экспериментов, нетрудно убедиться не только в их качественном, но и количественном совпадении.

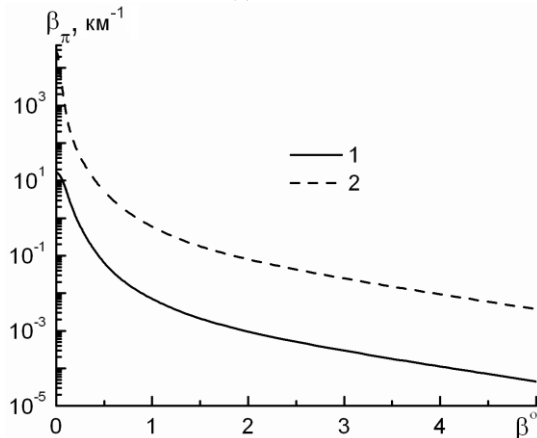


Рис. 1. Расчетные значения коэффициента обратного рассеяния $\beta_{\pi}(\beta)$ для системы ориентированных пластинок при $n=1.31$, $\chi=10^{-3}$, $\lambda=0.694 \text{ мкм}$, $\mu=5$; 1– $\bar{a}=37 \text{ мкм}$, $C=0.8 \text{ л}^{-1}$; 2– $\bar{a}=100 \text{ мкм}$, $C=25 \text{ л}^{-1}$.

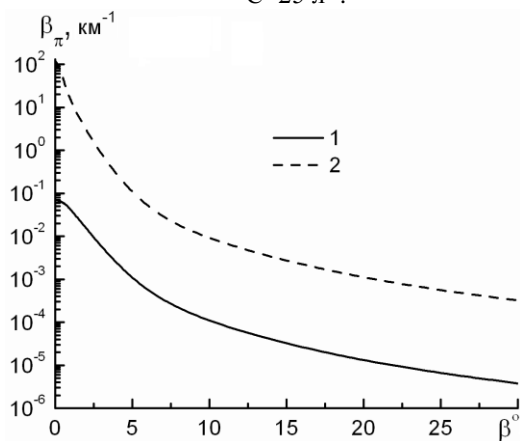


Рис. 2. Расчетные значения коэффициента обратного рассеяния для системы ориентированных пластинок при $n=1.31$, $\chi=10^{-3}$, $\lambda=10.6 \text{ мкм}$, $\mu=5$; 1– $\bar{a}=37 \text{ мкм}$, $C=0.8 \text{ л}^{-1}$; 2– $\bar{a}=100 \text{ мкм}$, $C=25 \text{ л}^{-1}$.

Для аномального обратного рассеяния характерным признаком является уменьшение на несколько порядков амплитуды отраженного сигнала при смещении оси лидара от зенитного направ-

ления (угол β). Так, при зондировании ледяных пластинок в видимой части диапазона (см. рис.1) отклонение оси лидара от вертикали всего на 1° приводит к уменьшению амплитуды отраженного сигнала на 4– 6 порядков. В ИК диапазоне (см. рис. 2) при сканировании лидара интенсивность сигнала меняется медленнее. Тоже самое изменение амплитуды обратного сигнала на 4– 6 порядков соответствует углам сканирования $10\text{--}20^\circ$. Следует заметить, что крутизна характеристик $\beta_{\pi}(\beta)$ в области малых углов однозначно связана со средним радиусом \bar{a} пластинчатых кристаллов. Это дает возможность при сканировании лидара вблизи вертикали по относительному изменению амплитуды отраженного сигнала оценить средние размеры кристаллов исследуемых облаков. Концентрация частиц C входит линейно в формулу (3) или в (1) с учетом (2). Это позволяет, не проводя дополнительных расчетов, а, только пользуясь результатами, представленными на рис.1 и 2, оценить коэффициенты $\beta_{\pi}(\beta)$ для кристаллических образований с произвольными концентрациями.

Заключение.

Для численного моделирования среды, формирующей высоко интенсивную зеркально отраженную лучистую энергию, рассмотрены кристаллы пластинчатой формы. На основании анализа результатов расчета энергетической характеристики (коэффициента обратного рассеяния) для зеркально отраженного излучения системой ориентированных пластинок, полученной в рамках метода физической оптики, установлены ярко выраженные регулярные зависимости от параметров распределения частиц по размерам. В данной работе показано, что система ориентированных кристаллов обладает особым механизмом светорассеяния. Это дает возможность, проводить дистанционное исследование микроструктуры кристаллического облака или тестирование водной поверхности на одной частоте.

Работа выполнена в рамках ГосЗадаания «Наука».

Литература

1. A. Borovoi, A. Konoshonkin, L. Kolokolova, Glints from particulate media and wavy surfaces. // J. of Quant. Spectr. Rad. Trans., 2012, V.113, P.2542–2551.
2. C.M.R. Platt Lidar backscatter from horizontal ice crystal plates. // J. Appl. Meteor. 1978, V.17, P.1220–1224.
3. О.В. Шефер, Оптическая модель пластинчатого кристалла применительно к бистатистическому поляризационному лазерному зондированию кристаллических облаков. // Оптика атмосферы и океана. 1999, Т.12, №7, С.573–577.
4. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.